ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967

Seria: GÓRNICTWO z. 22 Nr kol. 186

KAZIMIERZ PODGÓRSKI

ZASTOSOWANIE ROZWIĄZAŃ APARATÓW DO BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI SKAŁ I MATERIAŁÓW OBUDOWY

Streszczenie. W pracy autor podaje rozwiązania aparatów wraz z opisem ich zastosowania służących do wyznaczania zależności odkształceń od naprężeń skał i materiałów obudowy w ujęciu reologicznym.

1. Wstęp

Skały górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej ulegają odkształceniu w trójosiowym stanie naprężeń. Zjawisko odkształcania górotworu w zależności od naprężeń określane jest głównie przy pomocy wzorów opartych o teorię sprężystości a niekiedy o teorię plastyczności. Do obliczania wpływu ciśnienia górotworu na obudowę wyrobiska górniczego wzorami teoretycznymi wykorzystuje się zależności odkształcenia od naprężenia oraz inne własności fizykomechaniczne ustalone na drodze badań laboratoryjnych w jednoosiowym stanie naprężeń.

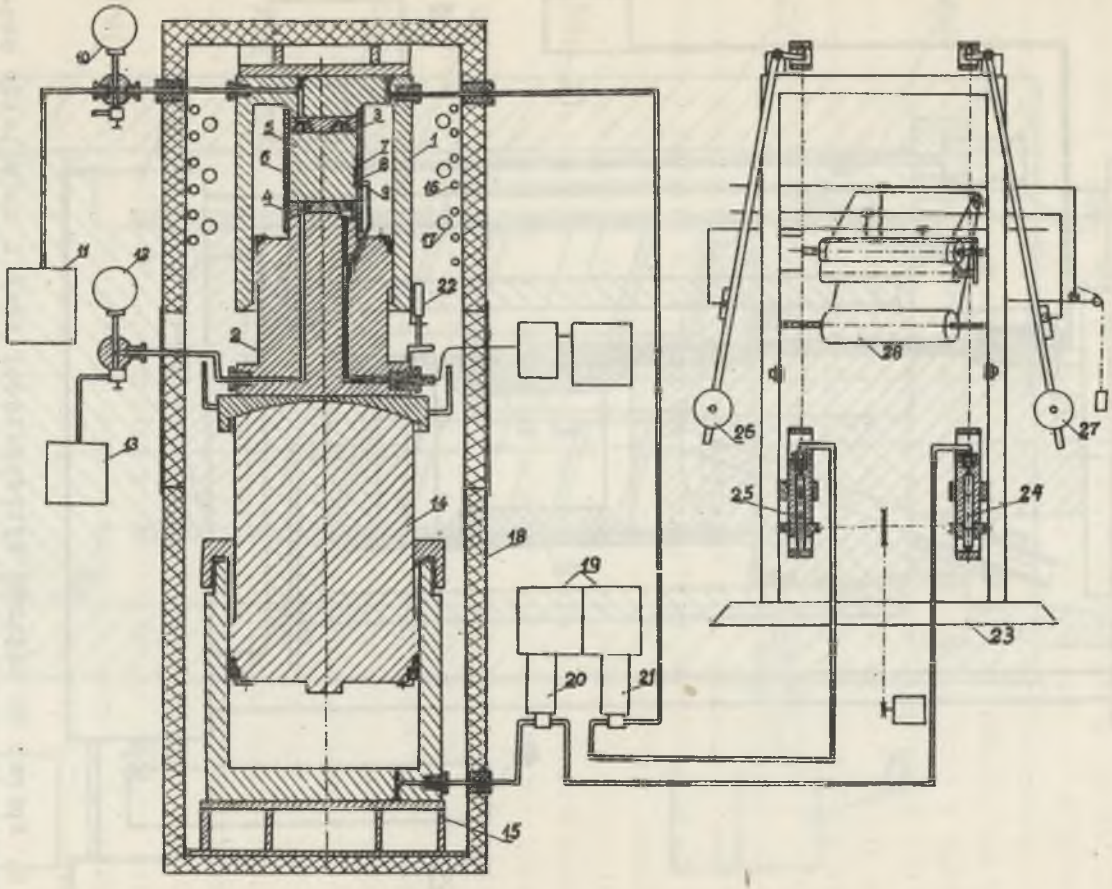
Z przeprowadzonych badań wynika, że własności wytrzymałościowe skał zależą od stanu naprężeń. Zachodzi więc potrzeba przeprowadzenia badań laboratoryjnych w sztucznie stworzonych warunkach takich, które by odpowiadały stanowi naprężeń w górotworze przed wykonaniem wyrobiska górniczego jak i po wykonaniu w czasie współpracy z wykonaną w nim obudową. Badania takie można przeprowadzić w poniżej opisanych aparatach.

2. Nowe rozwiązania aparatów do badania skał i materiałów obudowy poddanych działaniu przepływającego płynu przez badaną próbkę w trójosiowym stanie naprężeń

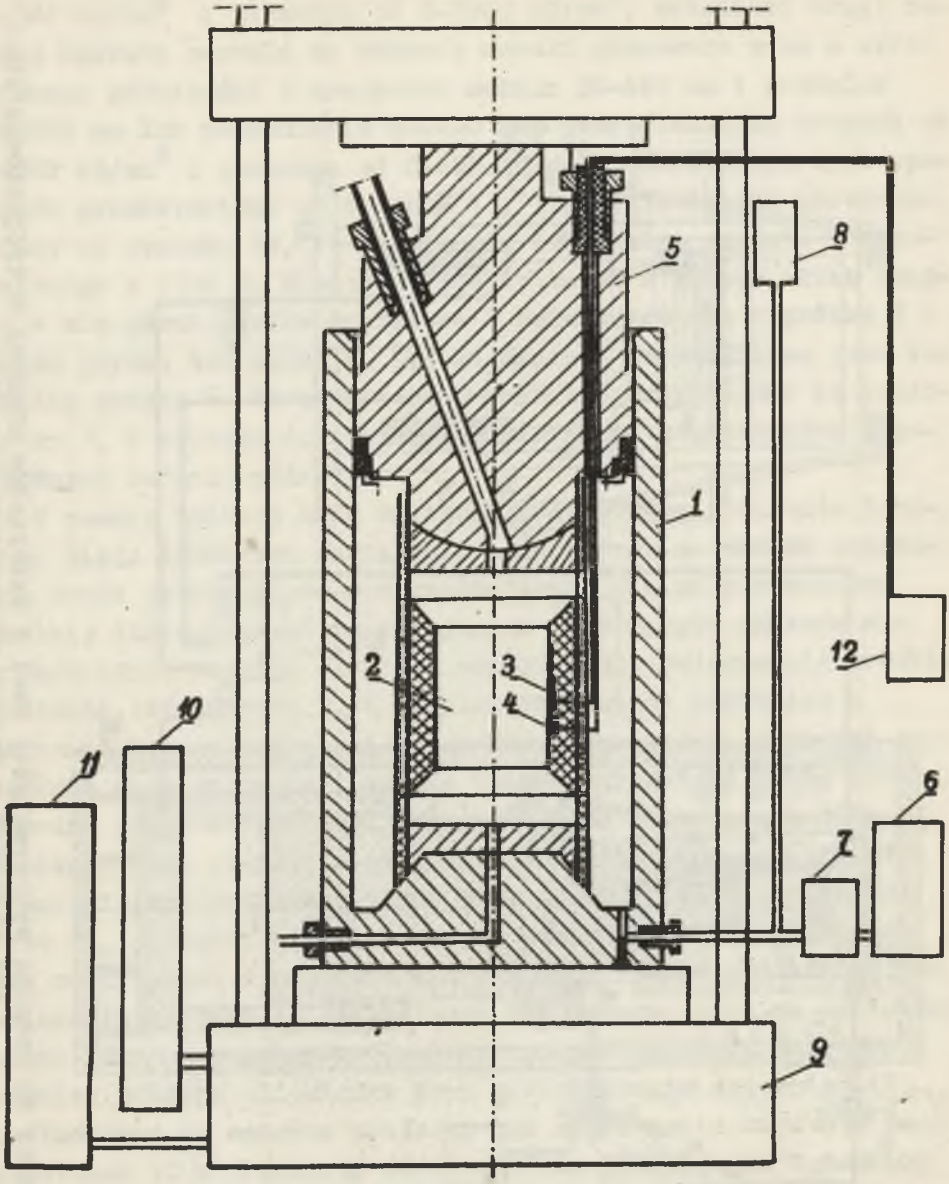
Aparaty te opracowane są w dwóch rodzajach. Pierwszy rodzaj aparatów zezwala na badanie próbek o wysokości 20–180 mm i średnicy lub prostokącie 30–80 mm, przy ciśnieniu bocznym od

0–500 kG/cm^2 i pionowym od 0–3000 kG/cm^2. Natomiast drugi rodzaj aparatu zezwala na badanie modeli górotworu wraz z wyrobiskami górniczymi o wysokości modelu 50–400 mm i średnicy 80–250 mm lub prostokącie 80–200 mm, przy ciśnieniu bocznym od 0–300 kG/cm^2 i pionowym od 0–600 kG/cm^2. Rozwiązania tych aparatów przedstawiono na rysunku 1A, 1B, 2, 3. Aparat przedstawiony na rysunku 1a, 1b składa się z cylindra aparatu 1 wyposażonego w tłok 3. Między czopem cylindra a czopem tłoka znajduje się górna płytka dociskowa 3 opierająca się o próbkę 5 i dolną płytkę dociskową 4. Próbka skały 5 uszczelniona jest koszulką gumową 6. Do powierzchni próbki 5 przyklejone są tensometry 7, 8 służące do pomiarów odkształceń poprzecznych i podłużnych badanej próbki.

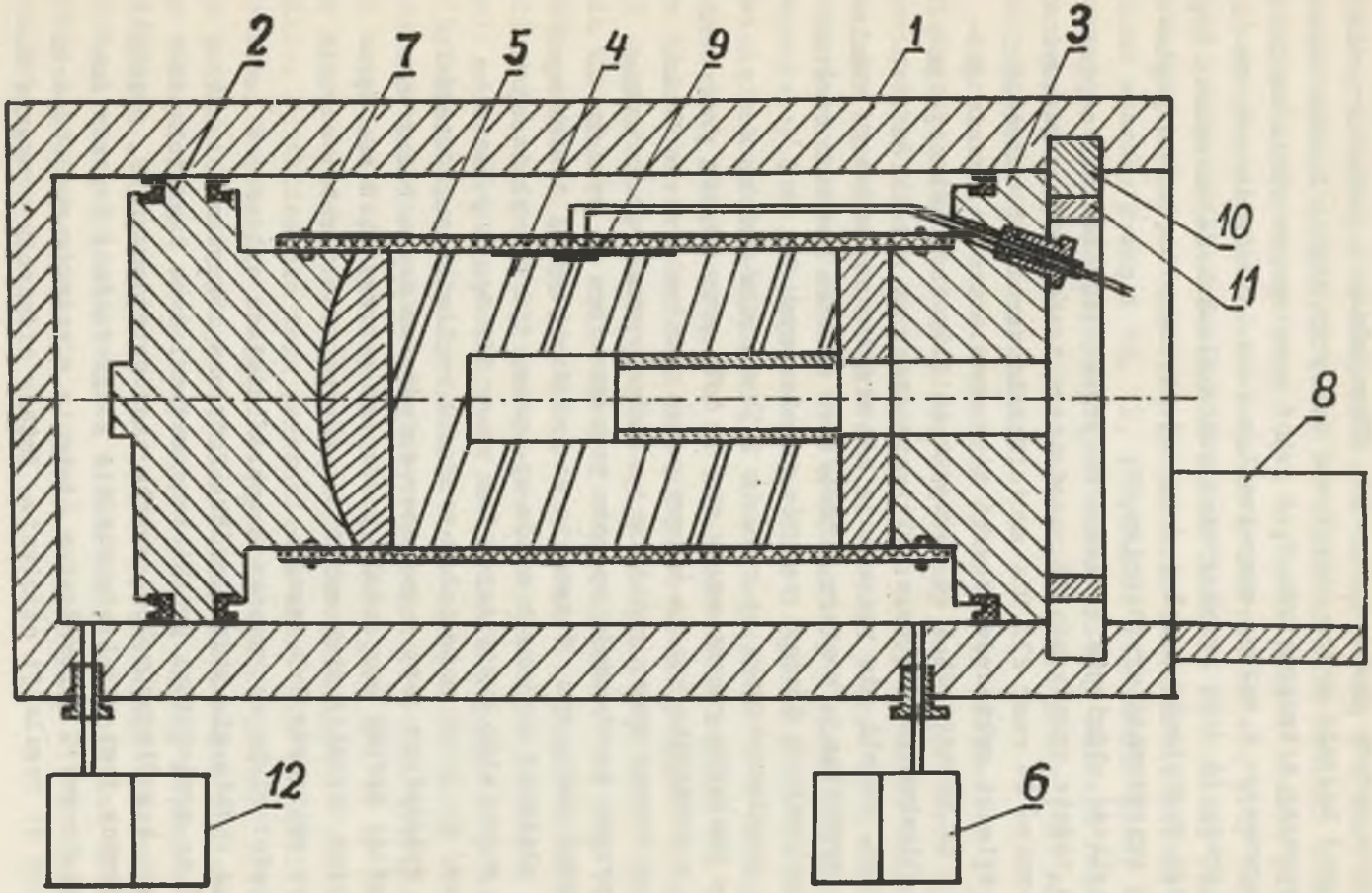
W czasie badania może wystąpić pod wpływem ciśnienia bocznego oleju dodatkowe naciąganie tensometrów na skutek wciskania drutu oporowego do por znajdujących się na powierzchni próbki; dlatego przed przyklejeniem tensometrów nakłada się kilkakrotnie warstwy oleju na oszlifowaną powierzchnię próbki. Końcówki tensometrów 7, 8 przylutowane są do podkładek z ostrzami 9 przechodzącymi przez koszulkę gumową. Ostrza 9 połączone są z przewodami mostka tensometrycznego. Przez próbkę 5 można przepuszczać płyn, który tłoczony byłby pompą 11 a wielkość tego ciśnienia odczytywana byłaby na manometrze 10. Ciśnienie wypływającego płynu odczytywane byłoby na manometrze 12, a jego ilość mierzona za pomocą licznika przepływu lub odczytywana w naczyniu miarowym 13. Próbka poddawana jest ściskaniu tłokiem 14 opierającym się poprzez olej na cylindrze prasy 14 i ramy aparatu 15. Ściskana próbka skały może być również poddana oziębieniu przy wykorzystaniu wężownicy 16 podłączonej do aparatu mroźnego lub nagrzewaniu cieczą w nagrzewnicy 17 podłączonej do urządzenia grzewczego. Wężownice osłonięte są izolacją termiczną 18. W czasie badania jedna pompa olejowa 19 tłoczy oliwę przez zawór przelewowy 20 wyposażony w dźwignię regulacji ciśnienia działającego na tłok prasy 14. Natomiast druga pompa tłoczy oliwę do cylindra 1. Wielkość ciśnienia oliwy na próbkę jest ustalana dźwignią z przesuwnym



Rys. 1. Aparat do badania wytrzymałości skał i materiałów obudowy w trójosiowym stanie naprężeń z dolnym wprowadzaniem próbki



Rys. 2. Aparat do badania wytrzymałości skał i materiałów obudowy w trójosiowym stanie naprężeń z górnym wprowadzaniem próbki



Rys. 3. Aparat do badania wytrzymałości skał i materiałów obudowy w trójosiowym stanie naprężeń z bocznym wprowadzaniem próbki

ciężarem zaworu przelewowego 21. Odkształcenia podłużne próbki w czasie badania można odczytywać tak przy użyciu mostka tensometrycznego i tensometrów 7, 8 jak i przy zastosowaniu czujnika zegarowego z osłoną przeciwwilgociową. Ciśnienie pod tłokiem prasy 14 jest przekazywane przez tłoczek 24 na wahacz 27, którego wychylenie z kolei jest rejestrowane na taśmie papierowej przesuwanej urządzeniem 28.

Wielkość ciśnienia bocznego na próbkę jest również zapisywana na taśmie urządzenia 28 napędzanego mechanizmem zegarowym umocowanym do ramy 23. Dla zmniejszenia tarcia tłoczków 24 i 25 o ścianki cylindrów tłoczki te w czasie przekazywania ciśnienia na wahacze 24 i 26 obracane są ślimacznicami napędzanymi ślimakami, które to z kolei napędzane są silnikiem elektrycznym. Jeżeli nie przewiduje się ciągłej rejestracji ciśnienia a wystarczają pomiary okresowe to wówczas można korzystać z wyskalowanych dźwigni zaworów przelewowych 20, 21.

Do przedstawionego na rys. 1a i 1b aparatu próbkę skały wraz z koszulką gumową wsuwa się od dołu przy użyciu prasy 14. Takie rozwiązanie wymaga budowy prasy o dużym wysuwie tłoka. Zamiast budowy prasy specjalnej o dużym wysuwie tłoka można wykorzystać rozwiązanie aparatu przedstawione na rysunku 2.

Aparat taki, rys. 2 ustawia się między płytami dociskowymi prasy służącej do innych celów np. prasy 150 ton służącej do badań materiałów budowlanych lub prasy 100 ton z pulsatorem służącej do badań materiałów w ujęciu reologicznym. Jeżeli prasa wyposażona jest w pulsator to wówczas można badać wytrzymałość próbki czy modelu poddanego wstrząsom. W ten sposób można określić zachowanie się skał w czasie robót strzelniczych wstrząsów lub tąpań.

Przedstawiony na rysunku 2 aparat posiada cylinder 1 do którego wkłada się badaną próbkę 2 np. na rozrywanie z naklejonymi na powierzchni próbki tensometrami 3 na cienkich podkładkach 4 podłączonych do mostka tensometrycznego 12. Próbka 2 poddawana jest ciśnieniu oleju z pompy ręcznej 6 przez zawór przelewowy 7 wyposażony w dźwignię z przesuwanym ciężarem służącym do regulacji ciśnienia. Zmiany ciśnienia w czasie ba-

dania wyrównywane są kompensatorem 8. Na próbkę 2 z góry działa tłok aparatu 5, tłok prasy 9. Wielkość siły docisku tłoka prasy wskazuje rejestrator 10, a wielkość siły i liczbę pulsacji urządzenie 11. Jeżeli badania przeprowadza się przy obniżonej temperaturze wówczas na aparat zakłada się osłony wraz z armaturą,którą podłącza się do agregatu zamrażarki. Przedstawione aparaty rysunek 1a, 1b, 2 wymagają stosowania prasy dla wywarcia ciśnienia pionowego na badaną próbkę. Dalszym rozwiązaniem,który eliminuje konieczność stosowania prasy jest aparat przedstawiony na rysunku 3.

Aparat ten, rysunek 3 posiada cylinder 1z tłokami 2 i 3. Między tłokami 2 i 3 znajduje się badany model górotworu 4. Na powierzchni modelu przyklejone są tensometry 9. Model osłonięty jest koszulką gumową 5,która na czopach tłoków 2, 3 umocowana jest drutem 7. Model wraz z tłokami 2, 3 wsuwa się po prowadnicy 8 do cylindra aparatu. Tłok 3 opiera się o pierścień oporowy składający się z trzech segmentów 10 i zabezpieczony jest pierścieniem 11. Na model górotworu wzdłuż osi działa tłok 2 a z boku ciśnienie oleju wywołane pompą 6. Pompa 12 zaopatrzona w zawór przelewowy i dźwignię regulacji ciśnienia tłoczy olej do cylindra wywierając ciśnienie na tłok 2. Równocześnie z pompą 12 tłoczy olej pompa 6 o takim stosunku ciśnienia aby próbka przez cały czas badana była ściskana. Jeżeli wielkość siły pochodzącej od ciśnienia z pompy 6 na tłok 2 byłaby większa od siły docisku tłoka ciśnieniem pompy 12 to wówczas koszulka gumowa uległaby rozerwaniu. W celu poprawnego ustawiania dźwigni regulacji ciśnienia pomp 6 i 12 na żądany stosunek ciśnień oblicza się względne przesunięcie obciążników. Po obliczeniu tego przesunięcia łączy się obciążniki drutem. Przesuwanie obciążnika (wysuniętego do przodu) powoduje przesunięcie drugiego obciążnika przy zachowaniu jednakowego odstępu dzięki czemu zachowany zostanie żądany stosunek ciśnienia. Przesuwanie obciążników zaopatrzonych w kółka po dźwigni regulacji ciśnienia z jednakową prędkością lub ustalanie dowolnego ciśnienia w czasie może odbywać się mechanicznie lub ręcznie.

Badania można przeprowadzić w temperaturze pokojowej lub obniżonej. Żądane obniżenie temperatury aparatu wraz z modelem górotworu można uzyskać po włożeniu aparatu do komory zamrażarki.

Podane rozwiązania aparatów można zastosować do badania przepuszczalności płynów przez próbkę lub model górotworu w różnych temperaturach.

3. Wyznaczanie przepuszczalności płynów przez próbkę ze skały lub materiału obudowy, przy przepływie przez próbkę płynu ruchem laminarnym lub burzliwym w zależności od stanu naprężeń ciśnienia płynu, temperatury oraz kierunku przepływu względem uławicenia badanej próbki skały

Znajomość wielkości współczynników przepuszczalności np. metanu ma duże znaczenie przy projektowaniu odmetanowania kopalń. Doniosłe znaczenie przy projektowaniu wyrobisk górniczych w zawodnionych warstwach górotworu jak i przy ustalaniu sposobu odwodnienia kopalni ma również współczynnik wodoprzepuszczalności.

Przez niektóre skały lub materiały obudowy płyn zaczyna widocznie przepływać dopiero przy ciśnieniu większym od jednostkowego spadku ciśnienia ∇ który określa tzw. szczelność skały. Wielkość ∇P_{st} określa szczelność badanej próbki tj. taki graniczny jednostkowy spadek ciśnienia przy którym nie występuje widoczny ruch wody, a próbka jest sucha lub zawilgocona pod wpływem napięcia powierzchniowego wody błonkowej i kapilarnej.

Przepływ płynu przez badaną próbkę może odbywać się ruchem laminarnym lub burzliwym w zależności od współczynnika przepływu. Przepływ płynu przez próbkę o współczynniku przepływu k_t odbywa się ruchem laminarnym z prędkością v przy jednostkowym spadku ciśnienia większym od ∇P_{st} i mniejszym od jednostkowego spadku ciśnienia ∇P_{gt}. Począwszy od spadku ciśnienia $\frac{dp}{dl}$ większego od ciśnienia ∇P_{gt} płyn przepływa ruchem burzliwym przez badaną próbkę skały o współczynniku przepływu ruchu burzliwego K_t i wykładniku potęgowym ruchu burzliwego m.

Równanie określające przepływ cieczy ruchem laminarnym z prędkością v na drodze dl pod wpływem spadku ciśnienia dp przez próbkę o współczynniku wodoprzepuszczalności k_t i szczelności ∇P_{st} posiada postać

$$\frac{dp}{dl} - \nabla P_{st} = k_t \cdot v \qquad (1)$$

Przy przepływie ruchem burzliwym występuje następująca zależność

$$\frac{dp}{dl} - \nabla P_{st} = K_t \cdot v^m \qquad (2)$$

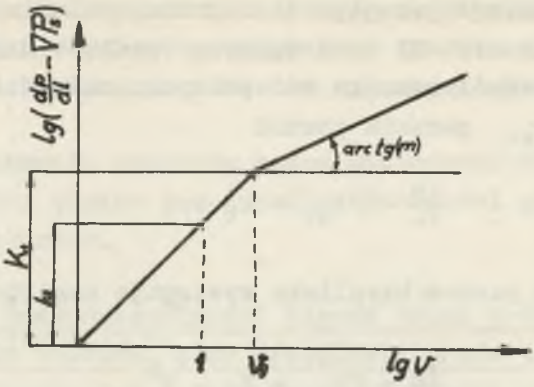
Po zlogarytmowaniu równania 1, 2 otrzymano

$$\lg\left(\frac{dp}{dl} - \nabla P_{st}\right) = \lg k_t + \lg v. \qquad (3)$$

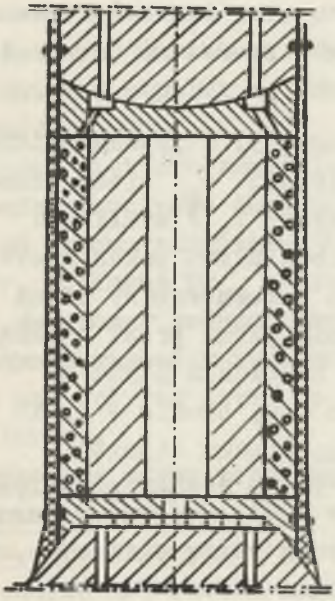
$$\lg\left(\frac{dp}{dl} - \nabla P_{st}\right) = \lg K_t + m \cdot \lg v \qquad (4)$$

Sporządzony wykres w oparciu o równania 3, 4 przedstawiono na rys. 4. Począwszy od prędkości granicznej v_g ciecz przepływa ruchem burzliwym. Potrzebne do równań 1, 2 wielkości k_t, K_t ∇P_{st} określające przepuszczalność płynu przez ciało porowate w zależności od stanu naprężeń i temperatury można wyznaczyć na podstawie pomiarów ciśnienia płynu przed próbką - p_1, ciśnienia płynu przed próbką - p_1, ciśnienia płynu za próbką - p_2, ilości wypływającego płynu - Q, czasie - t, i temperaturze - T. Wielkość jednostkowego spadku ciśnienia przepływu cieczy przez stały przekrój F na drodze przepływu l, można obliczyć ze wzoru

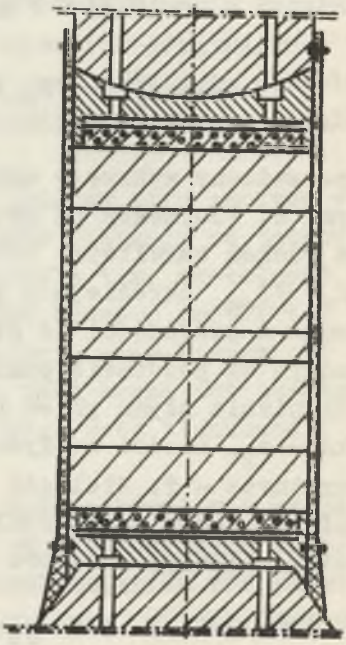
$$\frac{dp}{dl} = \frac{p_1 - p_2}{l} \qquad (5)$$



Rys. 4. Przebieg ruchu laminarnego i burzliwego w układzie osi logarytmicznych



Rys. 5. Usytuowanie w aparacie próbki w kształcie rury z otaczającą warstwą piasku przy wyznaczaniu przepuszczalności płynu wzdłuż promienia



Rys. 6. Usytuowanie w aparacie próbki przy wyznaczaniu przepuszczalności płynu prostopadle do uławicenia warstw

Średnią prędkość przepływu cieczy przez próbkę można obliczyć na podstawie ilości wypływającego płynu Q w czasie t przez całkowity przekrój próbki F ze wzoru

$$v = \frac{Q}{F \cdot t} \tag{6}$$

Gradient szczelności ∇P_{st} badanej próbki skały o długości l, w temperaturze T można obliczyć na podstawie pomierzonego ciśnienia p_s przy którym nie występuje widoczny wypływ płynu, ze wzoru

$$\nabla P_{st} = \frac{p_s}{l} \tag{7}$$

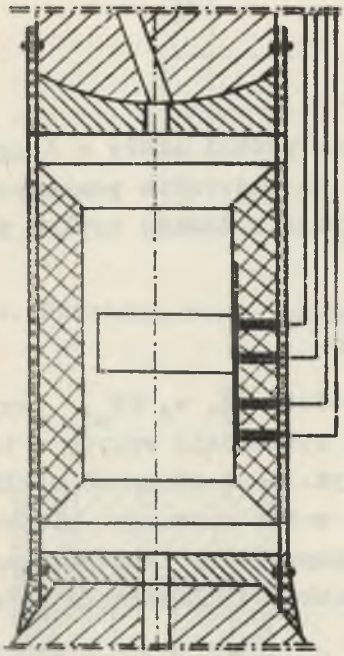
Wykorzystując tak określone wielkości $\frac{dp}{dl}$, v, ∇P_{st} przy żądanych naprężeniach w próbce można sporządzić wykres w logarytmicznym układzie współrzędnych (rys. 4) i odczytać wielkości k_t, K_t, v_g, m. W podobny sposób można wyznaczyć wielkości k_t, K_t, v_g, m przy różnych stanach naprężeń i temperaturach oraz kierunku przepływu płynu w stosunku do uławicenia badanej próbki skały.

Z dotychczas przeprowadzonych przez autora badań nad wpływem stanu naprężeń na wodoprzepuszczalność skał i materiałów obudowy wynika, że w zakresie naprężeń dopuszczalnych wpływ ten jest mały. Wpływ stanu naprężeń na wodoprzepuszczalność uwidacznia się znacznie na granicy wytrzymałości badanej próbki skały.

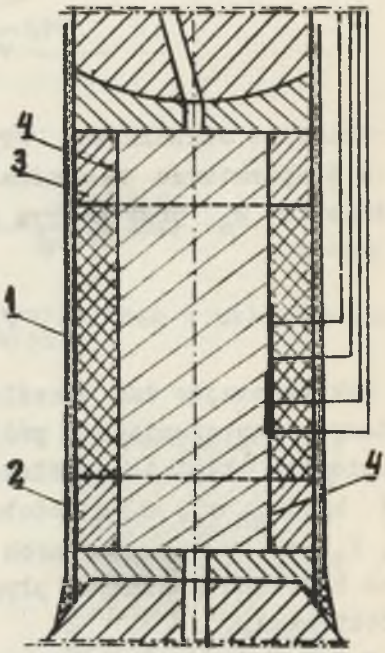
4. Wyznaczanie zależności między naprężeniami a odkształceniami skał i materiałów obudowy na rozrywanie, ściskanie, zginanie w trójosiowym stanie naprężeń w zależności od czasu i temperatury

Zależność odkształceń od naprężeń oraz wytrzymałość na rozrywanie skał i materiałów obudowy w trójosiowym stanie naprężeń wyznacza się w aparacie przedstawionym na rys. 1a, 1b, 2, 3. Na próbce specjalnie do tego celu przygotowanej. Próbki do badania mogą być wycięte i oszlifowane w formie walców rozsze-

rzających się u góry i u dołu rys. 7. Próbka 1 rys. 8 może być również wycięta w formie walca lub prostopadłościanu, na który



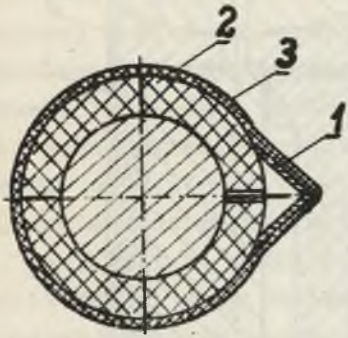
Rys. 7. Próbka z poszerzeniem u góry i dołu w aparacie



Rys. 8. Próbka z pierścieniami rozrywającymi w aparacie

zakłada się pierścienie rozrywające 2, 3 i mocuje je na końcach próbki przy pomocy spoiwa 4. Spoiwem takim może być np. klej, zaprawa gipsowa, zaprawa cementowa lub inne spoiwo. Do powierzchni próbki można przykleić płytki z tensometrami 5 służącymi do pomiaru odkształceń podłużnych i poprzecznych oraz temperatury próbki w czasie przeprowadzania badań. W celu zabezpieczenia powierzchni próbki przed przenikaniem oleju powodującego ciśnienie boczne na próbkę - przed jej założeniem do aparatu powleka się ją żywicami epoksydowymi lub nakłada koszulkę gumową. Dla zabezpieczenia przed uszkodzeniem końcówek tensometrów zakłada się osłonę 1 (rys. 9) wraz z wypełniaczami gumowymi 2 na którą nasuwa się koszulkę gumową 3. Po nasunięciu koszulki gumowej wyjmuje się osłonę 1 a przylutowane

do tensometrów końcówki stalowe przechodzą przez koszulkę gumową. Końcówki stalowe łączy się z przewodami mostka tensometrycznego. Końce koszulki próbki nasuwa się płytki dociskowe i czop tłoka aparatu. Płytki dociskowe mogą posiadać powierzchnię gładką lub porowatą z sprasowanego proszku np. korundowego połączonego spoiwem. Tak przygotowaną próbkę wkłada się do aparatu i wywiera stopniowo ciśnienie boczne oraz zmniejsza ciśnienie pod tłokiem prasy powodując rozciąganie próbki a w końcowym etapie jej rozerwanie. Przy badaniu należy zwracać uwagę aby pierścienie rozrywające stykały się z płytkami dociskowymi i czopami znajdującymi się na tłoku i cylindrze.

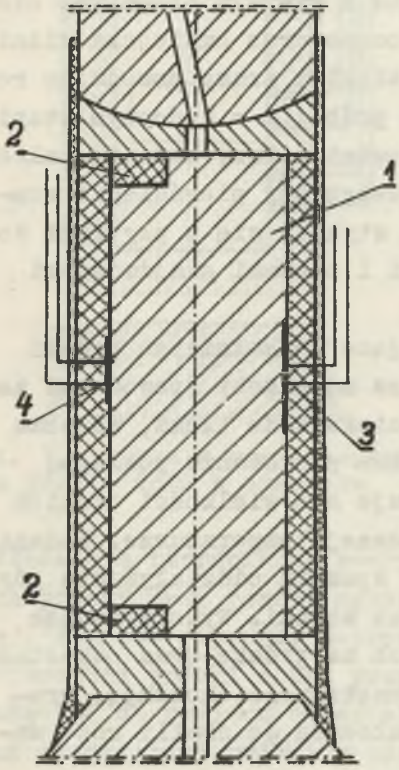


Rys. 9. Położenie osłony na tensometry i końcówki stalowe w czasie zakładania koszulki gumowej na badaną próbkę

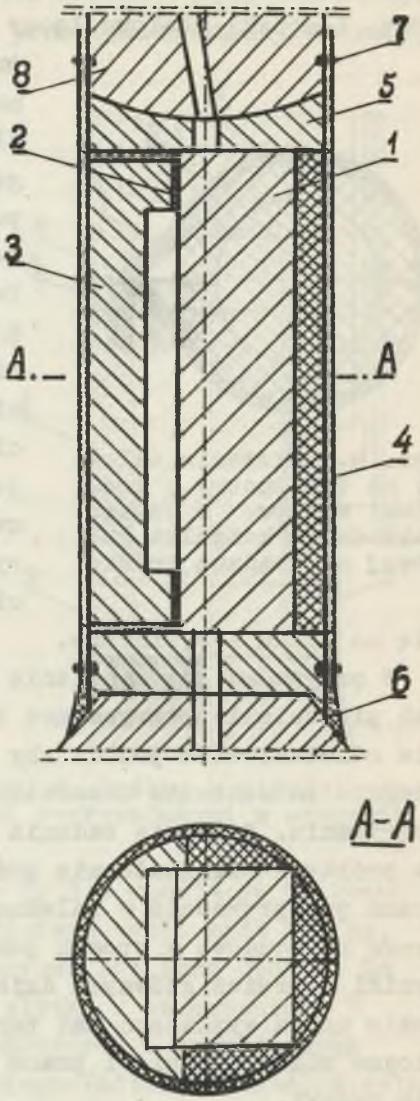
W przypadku gdy ciśnienie działające na kołnierze próbki lub pierścienie rozrywające będzie za małe żeby spowodować takie odkształcenie próbki aby ona dociskała do tłoka, wówczas ulegnie zniszczeniu uszczelka a próbka przestanie podlegać rozrywaniu. W czasie badania odczytuje się wielkości ciśnień na próbkę i odkształcenia próbki w danej temperaturze. Badanie można przeprowadzić w zależności od sposobu oddziaływania górotworu na obudowę w sposób powolny lub szybki. Wykorzystując wyniki naprężeń głównych działających na próbkę oraz odkształcenia można wyznaczyć kąt tarcia wewnętrznego, kohezję, graniczne odkształcenie i pracę odkształcenia do chwili rozerwania próbki.

W podobny sposób można również wyznaczyć podane wielkości wykorzystując wyniki badań na ściskanie próbek w trójosiowym stanie naprężeń.

Próbki skały lub materiału obudowy można badać przy mimośrodowym ściskaniu (rys. 10) w czasie którego występuje ściskanie i zginanie próbki. Próbka 1 u góry i u dołu jest wycię-



Rys. 10. Próbka w aparacie przy mimośrodowym ściskaniu



Rys. 11. Próbka w aparacie do badania wytrzymałości na zginanie przy obciążeniu ciągłym

ta a w wycięcie włożone są podkładki gumowe 2. Podkładki gumowe powodują, że obciążenie pionowe przenoszone jest głównie przez małe powierzchnie czołowe próbki. Po założeniu koszulki gumowej i włożeniu próbki do aparatu przeprowadza się badania. Wykorzystując wyniki z pomiarów odkształceń przy użyciu tensometrów 3, 4 jak i wielkości sił działających na próbkę w czasie można określić wpływ ciśnienia bocznego na wytrzymałość próbki oraz ułożyć wzory na obliczanie stanu naprężeń w czasie zginania i ściskania w trójosiowym stanie naprężeń.

Wielkości te można również wyznaczyć w oparciu o wyniki zginania próbki przy odciążeniu jednej płaszczyzny bocznej a obciążeniu ciągłym pozostałych płaszczyzn bocznych (rys. 11). W tym celu przygotowuje się próbkę 1 o przekroju prostokątnym. Z boku próbki zakłada się na podkładkach gumowych 2 osłonę 3, uszczelkę 4 na którą nasuwa się koszulkę gumową. U góry i dołu próbki zakłada się płyty dociskowe 5, 6 a koszulkę gumową przywiązuje drutem 7 do czopa tłoka 8. Przed włożeniem na próbkę koszulki gumowej można nakleić tensometry służące do pomiaru odkształceń. Tak przygotowaną próbkę wkłada się do aparatu i wywiera ciśnienie boczne powodując zginanie próbki a następnie jej złamanie. W czasie dalszego obciążania pękniętej próbki może nastąpić miażdżenie powierzchni styku. Wykorzystując wyniki z tego badania można ująć w sposób teoretyczny zginanie z jedną płaszczyzną odsłoniętą i wpływ tworzenia się przegubów w miejscu spękań grubych warstw skały. Zginanie z jedną płaszczyzną odciążoną występuje najczęściej podczas odkształcania się warstw stropu w kierunku wybranej przestrzeni. W miarę poszerzania wyrobiska górniczego ulegają zwiększaniu naprężenia rozrywające i po przekroczeniu doraźnej wytrzymałości na zginanie warstwy stropu pękają i tworzą się szczeliny. Spękany strop utrzymuje się nadal nad wyrobiskiem aż do momentu, gdy wypadkowa sił wewnętrznych przejdzie poza oparcie bloku skał na brzegach szczelin. Wzrastająca wielkość sił wewnętrznych w czasie powoduje miażdżenie skał na stykach spękań tak, że miejsce opierania się bloków będzie przesuwało się w kierunku osi obojętnej zginanej warstwy skały. Wypadkowa sił wewnętrz-

nych będzie wzrastała w miarę zbliżania się do miejsca styku spękań skały i po osiągnięciu przegubu spowoduje nagłe opadnięcie spękanej warstwy skały, które jest bardzo niebezpieczne dla pracującej załogi w wyrobisku. W celu określenia kiedy wystąpią niebezpieczne ruchu górotworu jak i opracowania sposobów zabezpieczenia pracujących górników zachodzi konieczność przeprowadzenia powyższych badań.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ КРЕПИ В ТРЁХОСЕВОМ НАПРЯЖЁННОМ СОСТОЯНИИ, С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РЕОЛОГИИ

Резюме

В работе автор приводит конструкционные решения аппаратов и описание их применения, служащих для определения зависимости деформаций от напряжений пород и материалов крепи с реологической точки зрения.

A POSSIBILITY OF APPLICATION DEVICES FOR THE EXAMINATION OF ROCKS AND LINING MATERIALS IN THE TRIAXIAL STRESS STATE WITHIN THE RHEOLOGICAL SYSTEM

Summary

In the paper the author gives the solutions of devices (with the description of their application) which are to determine dependences of deformations on the tensions of rocks and lining materials within the rheological system.